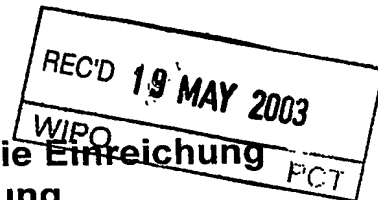


PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**



Aktenzeichen: 102 08 832.2

Anmeldetag: 01. März 2002

Anmelder/Inhaber: Continental Teves AG & Co oHG,
Frankfurt am Main/DE

Bezeichnung: Verfahren und Schaltungsanordnung zur Kalibrierung
von Spannungs- und Temperaturabweichungen des
Effektivstroms von Hydraulikventilen in einer PWM-
Ansteuerung

IPC: G 05 F 1/10

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 24. März 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Hiebinger

Verfahren und Schaltungsanordnung zur Kalibrierung von Spannungs- und Temperaturabweichungen des Effektivstroms von Hydraulikventilen in einer PWM-Ansteuerung

Es ist bekannt, daß bei einer Ventilansteuerung mittels pulsweitenmoduliertem Strom (PWM-Stromregelung), zumindestens wenn das Verhältnis zwischen PWM-Frequenz und der Zeitkonstanten der Spule ungünstig ist, signifikante Unterschiede zwischen dem eingeregelteten Sollwertstrom und dem Effektivwert in der Spule auftreten. Es ist außerdem bekannt, daß Abhängigkeiten von äußeren Parametern, wie Versorgungsspannung und Temperatur, existieren.

Zum Beispiel fließt durch eine dauerhaft eingeschaltete induktive Last (z.B. Ventilschule) der (maximal mögliche) Strom

$$I_{100\%} = V_{REFX} / (R_L + R_{DSON-LS}) \quad (1)$$

Dieser Strom hängt demnach ab

- von der Spannung an der oberen Seite des Ventils, und somit indirekt von der im Kraftfahrzeug verfügbaren Batteriespannung an Klemme KL30B,
- vom Spulenwiderstand R_L sowie (in geringerem Maße) von dem on-Widerstand $R_{DSON-LS}$ des/der Halbleiterbauelements/-e, welche zur Ansteuerung der Last/-en eingesetzt werden. Beide Widerstände sind stark temperaturabhän-

- 2 -

gig: Veränderungen von etwa 0.4 % pro 1 °C für den Lastwiderstand (das ist z.B. der Temperatur-Koeffizient für Kupfer, reale Spulen haben eine etwas geringere Abhängigkeit) und 0.5 % pro 1 °C für $R_{DSon-LS}$ (z.B. Power-MOSFESTs, realisiert auf einem Chip) sind typische Werte.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zum Treiben von Lasten anzugeben, welches Abweichungen von dem Sollstrom und dem in der Last fließenden Iststrom verringert.

Diese Aufgabe wird gelöst durch das Verfahren gemäß Anspruch 1 und die Schaltungsanordnung gemäß den Ansprüchen 11 und 12.

Die Erfindung betrifft demzufolge ein Verfahren und eine Schaltungsanordnung zur Kalibrierung von Spannungs- und Temperaturabweichungen in einer PWM-Regelung.

Ein wesentlicher Punkt der Erfindung ist, daß eine Kalibrierung von Spannungs- und Temperaturabweichungen des Effektivstroms von Hydraulikventilen bei PWM-Ansteuerung durchgeführt wird.

Weitere bevorzugte Ausführungsformen ergeben sich aus den Unteransprüchen und der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels an Hand von Figuren.

Es zeigen

Fig. 1 den Unterschied von Strommessung bei PWM-

Ansteuerung zum Mittelwert und dem Effektivwert,

Fig. 2 zeigt die Differenz Strommesswert zum Effektivwert für ein typisches Hydraulikventil, und

Fig. 3 die Differenz des Strommesswerts zum Effektivwert für ein typisches Hydraulikventil relativ zur Differenz, die bei einer Versorgungsspannung von 12 V und einer Temperatur von 25°C vorhanden ist.

Die Erfindung wird nun an Hand von Fig. 1 erläutert. Bei einer Stromregelung mittels PWM-Ansteuerung stellt sich ein mittlerer Strom

$$I_{AVG} = DC * I_{100\%} = DC * V_{REFx} / (R_L + R_{Dson-LS}) \quad (2)$$

ein, wobei DC das Tastverhältnis (*Duty Cycle*) der PWM-Ansteuerung angibt. Die Funktionsweise einer erfindungsgemäß einsetzbaren PWM-Regelung wurde bereits in der Internationalen Patentanmeldung PC/EP 0 115 040 beschrieben. Die Gleichheit gilt streng genommen nur bei einer Ansteuerung mittels Geraden 1 oder mit idealen e-Funktionen.

Für eine Stromregelung muß der aktuelle Spulenstrom gemessen werden. Aus Aufwandsgründen (Hardware) bietet sich eine Messung des Stromes bei ("at" dargestellt durch Symbol @) der halben Einschaltzeit t_{on} an. Der Regler stellt demnach

$$I_{mess} = I(@ t_{on}/2) = I_{soll} \quad (3)$$

ein. Der gemessene Strom I_{mess} entspricht dem Mittelwert I_{AVG} nur bei Ansteuerung durch Geraden. Bei einer Ansteuerung mit

idealen e-Funktionen (entspricht einer Spule ohne Eisenkern) ist der zum Zeitpunkt $t_{on}/2$ gemessene Strom höher als der Mittelwert. Bei einer Stromregelung eines Ventils interessiert aber letztlich der Effektivwert I_{RMS} , der noch etwas niedriger liegt als der Mittelwert. Bei einem Ventil, d.h. einer Spule mit Eisen, kommt es zusätzlich zu Sättigungseffekten (Hysterese), wodurch sich Nichtlinearitäten ergeben, wie aus dem Verlauf der Stromkurve 2 deutlich wird. Hieraus resultiert eine weitere Abweichung zwischen I_{RMS} und I_{mess} . Es gilt also nur näherungsweise

$$I_{soll} = I_{AVG} = DC \cdot V_{REFx} / (R_L + R_{Dson-LS}), \quad (4)$$

und umso besser, je höher die PWM-Frequenz liegt.

Fig. 2 zeigt die Differenz zwischen Strommesswert I_{mess} und Effektivwert I_{RMS} für das elektromagnetische Ventil eines elektronischen Bremsensteuergerätes, aufgetragen über den Sollwert I_{soll} , für verschiedene Spannungen an KL30B und verschiedene Spulentemperaturen. Die Wicklung der Spule hat im Beispiel einen Widerstand von 3.6Ω . Mit wachsendem Sollwert nimmt die Differenz ab: Dies resultiert dadurch, daß der Stromregler beginnt, in die Sättigung zu gelangen (d.h. der *Duty Cycle* beträgt etwa 100%).

Eine **erste Kompensation** ist noch relativ einfach, um nämlich die Abhängigkeit vom Sollwertstrom zu eliminieren. Für einen bestimmten Sollwert wird ein dem Diagramm zu entnehmende Stromdifferenz hinzuaddiert. Dies gelingt nur für eine bestimmte Spannung und eine bestimmte Temperatur. Beispiel: Sollwert-Kompensation bei $V_{KL30B} = 12 \text{ V}$ und $T = 25 \text{ °C}$ (Kurve

3). Um einen Effektivwert von 1 A zu erreichen wird ein Sollwert von 1 A + 62.5 mA vorgegeben.

Fig. 3: Um Abhängigkeiten von der Spannung und der Temperatur zu erfassen, ist es sinnvoll, die Abweichung der Kurven aus Fig. 2 von einer Referenzkurve (bei $V_{KL30B} = 12$ V und $T = 25$ °C) darzustellen (siehe Abbildung 3). Man erkennt, daß bei z.B. 1.1 A Sollwert eine maximale Spannungsabhängigkeit von -37.5 mA / +29 mA bei einer Spannungsvariation von [9 V 16.5 V] über einer konstanten Temperatur von 25 °C herrscht. Umkehrt kann man bei einer Temperaturvariation von [-40 °C 180 °C] über einer konstanten Spannung von 12 V eine maximale Temperaturabhängigkeit von +10.5 mA/-25.5 mA bei 1.1 A Sollwertvorgabe ablesen. Diese beiden Abhängigkeiten addieren sich nicht einfach linear, denn in den beiden Eckpunkten {17 V, -40 °C} und {9 V, 180 °C} werden für 1.1 A lediglich Abweichungen von +30.5 mA/-49.5 mA erreicht. Der Einfluß der Spannung ist aber signifikant größer als der der Temperatur.

Für eine **Kompensation der Spannungsabhängigkeit** ist es sinnvoll, aus Fig. 3 eine (ventilspezifische) Tabelle an bestimmten diskreten Stützpunkten zu extrahieren: Für Wertepaare $\{I_{soll} , V_{KL30B}\}$ wird jeweils ein ΔI zur Sollwert-Anpassung abgelegt. Zwischenwerte werden durch Interpolation ermittelt. Um Sollwertsprünge auszugleichen ist eine Mittelung über den aktuellen Sollwert und vergangene Werte sinnvoll. Als aktuellen Sollwert sollte derjenige zurückliegende Wert verwendet werden, der am ehesten bereits eingeregelt worden ist (unter Berücksichtigung der Zeitkonstanten des angesteuerten Ventils).

Um Schwankungen bzw. Sprünge der Versorgungsspannung (z.B. an KL30B) auszugleichen, ist es bevorzugt eine Mittelung über die aktuelle Spannungsmessung und vergangene Werte durchzuführen.

Eine **Kompensation der Temperaturabhängigkeit** ist aufwendiger. Eine indirekte Erfassung der Temperatur kann über den von der Stromregelung eingestellten *Duty Cycle* erfolgen. Aus Gleichung (4) folgt nämlich

$$R_L + R_{Dson-LS} = (DC \cdot V_{REFx}) / I_{soll}. \quad (5)$$

Diese Formel besagt, daß für den aktuellen *Duty Cycle* letztlich nur der Spulenwiderstand (und der *on*-Widerstand) verantwortlich ist; die Spulentemperatur erscheint nur indirekt. Deshalb ist es zunächst sinnvoll, die Daten aus Abbildung 3 in eine Abhängigkeit des Spulenwiderstandes (und des *on*-Widerstandes) umzurechnen:

$$\begin{aligned} R_L &= R_L(@ 25^\circ\text{C}) (1 + 0.00392 \cdot (\text{Temp.} - 25^\circ\text{C})) \text{ bzw.} \\ R_{Dson-LS} &= R_{Dson-LS} (@ 25^\circ\text{C}) (1 + 0.005 \cdot (\text{Temp.} - 25^\circ\text{C})). \end{aligned} \quad (6)$$

Die Abhängigkeit auf $R_L + R_{Dson-LS}$ und nicht auf die Temperatur zu beziehen hat außerdem den wichtigen Vorteil, daß unterschiedliche Temperaturen im Ventil und im Chip richtig erfaßt werden, da im aktuellen *Duty Cycle* diese unterschiedlichen Temperaturen implizit enthalten sind.

In einer Tabelle wird wiederum für Wertepaare $\{I_{soll}, R_L + R_{Dson-LS}\}$ jeweils ein ΔI zur Sollwert-Anpassung abgelegt. Hier ist eine zusätzliche Kalibrierung sinnvoll, da Gleichung 4

nur näherungsweise gilt. Es bietet sich an, den *Duty Cycle* bei einem konkreten Ventil und Referenzwerten (z.B. $I_{soll}=1A$, Temp.=25°C, $V_{KL30B}=12V$) zu messen und die Tabelle mittels eines entsprechenden Offsets umzurechnen.

Algorithmus zur Temperatur-Kompensation

Wichtig ist eine (wenn auch indirekte) Mittelwertbildung des *Duty Cycles* über mehrere PWM-Perioden, um den Einfluß des Ausregelns des Stromreglers zu eliminieren.

Da sich die Spulentemperatur nur recht langsam ändert (Zeitkonstante im Sekundenbereich), braucht der folgende Algorithmus auch nur in einer ca. 100ms bis 500ms Schleife regelmäßig ausgeführt zu werden.

- Aktuellen *Duty Cycle* DC_{actual} auslesen
- Aktuelle Spannung $V_{REFx-actual}$ (bzw. $V_{KL30B-actual}$) auslesen
- Als $I_{soll-actual}$ den Sollwert verwenden, der am ehestens bereits eingeregelt worden ist
- $R_{actual} = (DC_{actual} * V_{REFx-actual}) / I_{soll-actual}$
- $R_{AVG} = R_{AVG}/2 + R_{actual}/2$
- Mit R_{AVG} (= $R_L + R_{Dson-LS}$) auf die Tabelle zur Temperatur-Kompensation zugreifen.

In obiger Berechnung geht der aktuelle *Duty Cycle* zu 50% ein, der vormalige Wert (eine Schleife vorher ausgelesen) zu 25%, der vorvormalige zu 12.5%, etc. Mit anderen Gewichtungen lassen sich andere Mittelungen erreichen. Mit

$$R_{AVG} = 3R_{AVG}/4 + R_{actual}/4$$

z.B. aktueller *Duty Cycle* zu 25%, der vormalige Wert 18.75%, der vorvormalige 14.1%, etc.

Die Mittelung von R_{actual} anstelle des *Duty Cycles* hat den Vorteil, daß Sollwertsprünge sowie Schwankungen bzw. Sprünge an KL30B richtig erfaßt werden.

Beim Start (*Ignition*) bietet es sich an, zu Beginn für R_{AVG} den Nominalwert des Spulenwiderstandes zu verwenden, oder (aufwendiger) den Spulenwiderstand bei der aktuell gemessenen Reglertemperatur hierfür auszurechnen.

Aufwand Hardware- bzw. Software-Realisierung

Eine hardware-mässige Realisierung scheint sehr aufwendig zu sein: mehrere Tabellen mittels programmierbarem Speicher realisieren. Multiplizierer, Dividierer, Addierer sowie Register zum Halten des gemittelten Spulenwiderstands.

Bei einer SW-Realisierung muß die Hardware den aktuellen *Duty Cycle* aller PWM-Ventilstufen verfügbar machen.

Alternative Kompensation der Temperaturabhängigkeit

Die Spulentemperatur setzt sich zusammen aus der Temperatur, die im Regler herrscht, sowie additiv einer Temperaturerhöhung durch die Spulenbestromung selbst (Eigenerwärmung, abhängig von I_{so11}). Eine teilweise Kompensation der Temperaturabhängigkeit kann dadurch erfolgen, daß nur die globale Reglertemperatur gemessen und berücksichtigt wird. In diesem

Falle würde näherungsweise eine konstante Temperaturerhöhung durch die Spulenbestromung angenommen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Verringerung von Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Laststrom (I_{RMS}) und dem ermittelten Laststrom in einer pulsweitenmodulierten Stromregelung, insbesondere für elektronische Kraftfahrzeugbremsensteuergeräte, dadurch **gekennzeichnet**, daß der ermittelte Laststrom (I_{mess}) zu einem bestimmten vorgegebenen Zeitpunkt innerhalb einer Ansteuerperiode (T_{PWM}) ermittelt wird und eine Kompensation durch temperaturabhängige und/oder versorgungsspannungsabhängige Ausgleichswerte erfolgt, welche zum ermittelten Laststrom hinzuaddiert werden, so daß ein korrigierter Sollwert (I_{soll}) für die Stromregelung zur Verfügung steht.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch **gekennzeichnet**, daß die Versorgungsspannungsabhängigkeit kompensiert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch **gekennzeichnet**, daß die Ausgleichswerte tabellarisch, insbesondere in einem Datenspeicher, abgelegt sind.
4. Verfahren nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch **gekennzeichnet**, daß mehrere Lasten angesteuert werden und die Ausgleichswerte individuell für jede Last, insbesondere für jede Ventilschleife, festgelegt sind.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 oder 4, dadurch **gekennzeichnet**, daß für Temperaturen und/oder Versorgungsspannungen, welche zwischen zwei Tabellenwerten liegen,

zur Ermittlung des optimalen Ausgleichswertes eine Interpolation durchgeführt wird.

6. Verfahren nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch **gekennzeichnet**, daß eine Mittelung über den aktuellen Sollwert und vergangener Sollwerte vorgenommen wird, um Sollwertsprünge auszugleichen.
7. Verfahren nach mindestens einem der vorherigen Ansprüche, dadurch **gekennzeichnet**, daß die Temperatur indirekt über den von der Stromregelung eingestellten Duty Cycle ermittelt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch **gekennzeichnet**, daß zur Temperaturermittlung die Summe (R_{AVG}) aus Spulenwiderstand (R_L) und Widerstand des angeschalteten Halbleiterbauelements zum Treiben der Last ($R_{DSon-LS}$) herangezogen wird.
9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8, dadurch **gekennzeichnet**, daß für die Temperaturmessung bzw. die Ermittlung des indirekten Temperaturwertes die Duty Cycles mehrerer PWM-Perioden (T_{PWM}) gemittelt werden.
10. Verfahren nach mindestens einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch **gekennzeichnet**, daß unmittelbar nach dem Einschalten, insbesondere nach Zündungsneustart, für den Mittelwert der indirekt ermittelten Temperaturgröße (R_{AVG}) der nominale Widerstandswert der Spule der Spulenwiderstand bei der aktuell gemessenen oder geschätzten Steuergerätemperatur verwendet wird.

11. Schaltungsanordnung zum Ansteuern von mehreren induktiven Lasten umfassend eine Schaltung zur PWM-Regelung des Laststroms, dadurch **gekennzeichnet**, daß das Verfahren gemäß mindestens einem der Ansprüche 1 bis 9 als Programm in einem Mikrorechner oder Mikrorechnersystem ausgeführt wird, welcher/welches mit dem PWM-Schaltung elektrisch verbunden ist.
12. Schaltungsanordnung zum Ansteuern von mehreren induktiven Lasten umfassend eine Schaltung zur PWM-Regelung des Laststroms, insbesondere nach Anspruch 11, dadurch **gekennzeichnet**, daß das Verfahren gemäß mindestens einem der Ansprüche 1 bis 9 zumindest zum Teil durch digitale Logik realisiert ist.

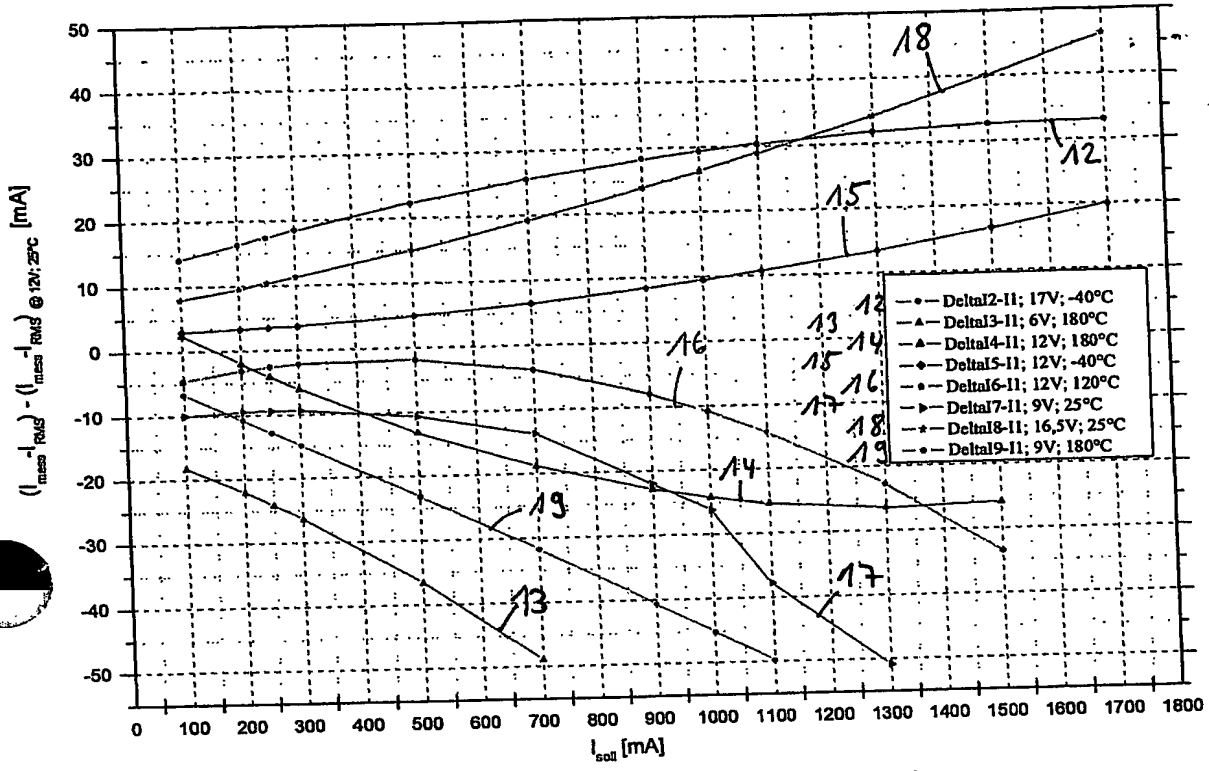


Fig.3